

基于空间解析模型观测器的永磁同步电机 直接转矩控制算法优化

钟再敏, 尤俊明, 周水华
(同济大学汽车学院, 上海 201804)

摘要: 针对永磁同步电机(PMSM)直接转矩控制(DTC)中磁链和转矩观测器误差较大引起的转矩脉动的问题,提出了一种基于空间解析模型的磁链和转矩观测器,并应用于基于空间矢量脉宽调制的直接转矩控制(SVPWM-DTC)中。通过有限元仿真获取磁链和转矩数值解,由该数值解推导了一种考虑电机空间谐波和磁饱和特性的磁链和转矩空间解析模型,构建了一种新型高精度的磁链和转矩观测器。仿真和试验对比表明,基于空间解析模型的观测器具有较高精度,能够有效抑制观测器误差导致的SVPWM-DTC转矩脉动。

关键词: 永磁同步电机; 直接转矩控制; 空间解析模型; 磁链和转矩观测器; 转矩脉动

中图分类号: TM 351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2020)05-0022-06

doi: 10.12177/emca.2020.013

Optimization of Direct Torque Control Algorithm for Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Spatial Analytical Model Observer

ZHONG Zaimin, YOU Junming, ZHOU Shuihua

(School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Aiming at the problem of torque ripple caused by large errors of flux linkage and torque observer in direct torque control (DTC) of permanent magnet synchronous motor (PMSM), a flux linkage and torque observer based on spatial analytical model is proposed and applied to DTC based on space vector pulse width modulation (SVPWM). Numerical solutions of the flux linkage and torque are obtained through finite element simulation, with which a flux linkage and torque spatial analytical model considering the space harmonics and magnetic saturation characteristics of the motor is derived. Based on these, a new type of high-precision flux linkage and torque observer is constructed. Simulation and experimental results show that the observers based on the spatial analytical model can effectively suppress torque ripple of SVPWM-DTC caused by observation errors.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); direct torque control (DTC); spatial analytical model; flux linkage and torque observer; torque ripple

0 引言

直接转矩控制(DTC)是一种常用的永磁同步电机(PMSM)控制策略,以磁链和转矩作为被控对象,与磁场定向控制(FOC)相比,有更快的响应速度^[1]。传统DTC由于采用滞环控制器,存在转

矩脉动大、开关频率不稳定等问题^[2]。一个有效的改进方法是将占空比调制引入DTC^[3]。文献[4]在控制周期中添加了零矢量,使得输出电压矢量幅值可调,有效减小了转矩脉动。文献[5]将占空比调制与模型预测控制结合,提出了三矢量模型预测转矩控制。文献[6-7]将空间矢量脉

收稿日期: 2020-01-13; 收到修改稿日期: 2020-03-16

作者简介: 钟再敏(1973—),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为新能源汽车驱动传动控制技术。

尤俊明(1994—),男,硕士研究生,研究方向为车用电机控制算法。

宽调制(SVPWM)引入DTC,在电压模型离散化的基础上,通过SVPWM使下一控制周期电压矢量的幅值和相角均可调整,控制器开关频率固定,能够有效减小转矩脉动。SVPWM-DTC是一种控制性能优异的DTC策略。

磁链和转矩观测器的精度会直接影响DTC的控制效果,磁链观测器的精度同时也会影响转矩的观测,因此不少学者对如何提高磁链观测器的精度进行了研究^[8]。磁链观测器主要基于传统电压模型和电流模型。电压模型采用纯积分器,会引起磁链的直流偏移,在低速时观测准确性低;电流模型对电机参数的变化敏感,会导致在实际的运行过程中存在较大的观测误差。针对该问题,文献[9]采用神经网络智能方法构造定子磁链观测器;文献[10]提出了基于模型参考自适应的定子磁链自适应观测器;文献[11]提出的基于扩展卡尔曼滤波的定子磁链观测器对系统参数扰动的影响起到了较好的抑制作用,但计算量大。提高磁链观测器精度的关键在于跟踪磁链的空间谐波和磁饱和等非线性特性,目前常用的方法包括自适应控制和神经网络等。这些方法一般是通过自学习降低参数扰动带来的影响,而不是通过描述磁链本身的谐波特性进行磁链观测。

本文首先研究了SVPWM-DTC控制算法,在此基础上,从描述电机谐波特性的角度出发,提出了一种磁链和转矩的空间解析模型,由此构造了高精度的磁链和转矩观测器,实现SVPWM-DTC磁链和转矩的精确控制。通过仿真和试验验证了观测器具有较高的精度,并且对转矩脉动抑制的效果显著。

1 基于SVPWM的DTC

PMSM电压矢量方程为

$$u_s = Ri_s + \frac{d\psi_s}{dt} \quad (1)$$

式中: u_s 、 i_s 、 ψ_s 分别为定子电压、电流和磁链矢量; R 为定子电阻。

对电压矢量方程进行离散化可得:

$$u_s(k+1) = Ri_s(k) + \frac{\psi_s(k+1) - \psi_s(k)}{T} \quad (2)$$

式中: k 为当前控制周期; $k+1$ 为下一控制周期; T 为控制周期。

在 $\alpha\beta$ 坐标系下可以实现电压方程的解耦,即:

$$\begin{cases} u_\alpha(k+1) = i_\alpha(k)R + \frac{\psi_s^* \cos\rho_s(k+1) - \psi_\alpha(k)}{T} \\ u_\beta(k+1) = i_\beta(k)R + \frac{\psi_s^* \sin\rho_s(k+1) - \psi_\beta(k)}{T} \end{cases} \quad (3)$$

式中: u_α 、 u_β 、 i_α 、 i_β 、 ψ_α 、 ψ_β 分别为定子电压矢量、定子电流矢量和定子磁链矢量在 α 、 β 轴的分量; ψ_s^* 为磁链幅值设定值; ρ_s 为定子磁链矢量与 α 轴夹角。

下个控制周期磁链矢量相角 $\rho_s(k+1)$ 可表示为

$$\rho_s(k+1) = \rho_s(k) + \omega T + \Delta\delta_{sl}(k) \quad (4)$$

式中: ω 为电角速度,与控制周期的乘积近似表示转子位置增量 $\Delta\theta_r$; $\Delta\delta_{sl}$ 为负载角增量,负载角与转矩成正相关,可以通过PI控制器获得负载角增量。PI控制器的输入为参考转矩和转矩观测器反馈转矩的差值,从而实现转矩的闭环控制。

SVPWM-DTC控制框图如图1所示。核心是通过磁链在当前周期算出下一控制周期所需的电压矢量。式(3)中 i_α 、 i_β 由电流传感器经坐标变换得到, ψ_α 、 ψ_β 由磁链观测器获得,电阻为恒定参数,控制周期根据逆变器开关频率设定。转矩由最大转矩电流比(MTPA)可以得到参考电流,再通过电流和磁链的关系得到磁链幅值的设定值 ψ_s^* 。下个周期磁链矢量角度由式(4)获得,由此计算下一控制周期的 $\alpha\beta$ 轴磁链,然后与磁链观测器反馈当前控制周期磁链和电流通过式(3)计算出下个控制周期电压,逆变器通过SVPWM算法在下一个控制周期输出目标电压矢量,实现PMSM的转矩控制。

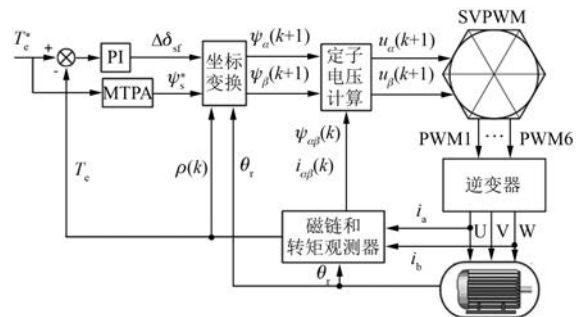


图1 SVPWM-DTC控制框图

2 基于空间解析模型的观测器

2.1 传统磁链和转矩模型

传统的电机磁链和转矩模型为

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (5)$$

$$T_e = 1.5p[\psi_f i_q + (L_d - L_q)i_d i_q] \quad (6)$$

式中： ψ_d 、 ψ_q 、 L_d 、 L_q 、 i_d 、 i_q 分别为 d 、 q 轴定子磁链、电感和定子电流； ψ_f 为转子永磁磁链； T_e 为电磁转矩； p 为定子极对数。

该模型是在假设永磁体和三相绕组产生的磁场在气隙中为正弦分布且定、转子铁心磁导率无穷大的基础上建立的。因此，该模型是对电机的一种简化描述，无法体现 PMSM 因齿槽产生的空间谐波和铁心的磁饱和特性。在需要对磁链和转矩进行观测和精确控制的 DTC 中，以这样的简化模型作为观测器会导致较大的观测误差，产生较大的转矩脉动。

2.2 磁链和转矩空间解析模型

电机的有限元模型能够反映出电机的空间谐波、磁饱和等非线性特性。通过对 PMSM 进行有限元仿真分析，设定不同的电流激励，能够获得 PMSM 在不同工况点 (i_d, i_q) 下各个转子位置 θ_r 上的 d 、 q 轴磁链 $\psi_{d,q}(i_d, i_q, \theta_r)$ 和电磁转矩 $T_e(i_d, i_q, \theta_r)$ 数值解，该数值解充分反映了电机的空间谐波和磁饱和特性，但这是一组数据量较大的离散三维数据表，需要基于这些数据进行拟合，获得连续的磁链和转矩空间解析模型^[12]。

在特定的转子位置上，采用多项式拟合磁链和转矩随电流的变化情况为

$$\begin{cases} \psi_d^k(i_d, i_q) = \sum_{i=0}^{N_1} \sum_{j=0}^{N_1-i} A_{d,ij}^k i_d^i i_q^j = \\ \quad [A_{d,00}^k, A_{d,10}^k, \dots, A_{d,0N_1}^k] \mathbf{X}(i_d, i_q) \\ \psi_q^k(i_d, i_q) = \sum_{i=0}^{N_1} \sum_{j=0}^{N_1-i} A_{q,ij}^k i_d^i i_q^j = \\ \quad [A_{q,00}^k, A_{q,10}^k, \dots, A_{q,0N_1}^k] \mathbf{X}(i_d, i_q) \\ T_e^k(i_d, i_q) = \sum_{i=0}^{N_1} \sum_{j=0}^{N_1-i} A_{t,ij}^k i_d^i i_q^j = \\ \quad [A_{t,00}^k, A_{t,10}^k, \dots, A_{t,0N_1}^k] \mathbf{X}(i_d, i_q) \end{cases} \quad (7)$$

式中： $\mathbf{X}(i_d, i_q)$ 为拟合多项式基底， $\mathbf{X}(i_d, i_q) =$

$[1, i_d, i_q, i_d^2, i_d i_q, \dots, i_q^{N_1}]^T$ ； N_1 为拟合多项式的最高阶次； k 为不同转子位置上对应的拟合数据； \mathbf{A}_d 、 \mathbf{A}_q 、 \mathbf{A}_t 为拟合系数矩阵，维度为 $k \times (N_1 + 1)$ ($(N_1 + 2)/2$)。

通过磁链和转矩数值解对电流的拟合，可以跟踪电感随电流非线性变化的情况，从而描述电机的磁饱和特性。

为了描述电机的空间谐波特性，需要获得磁链和转矩随转子位置 θ_r 的变化规律。式(7)、式(8)中特定的拟合系数在 θ_r 维度上的变化情况如图 2 所示。

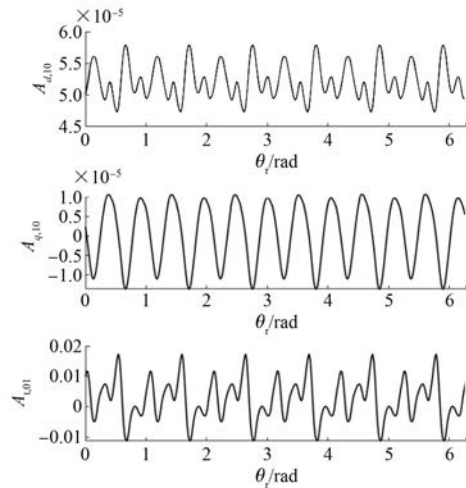


图 2 电流多项式拟合系数周期性

由图 2 可以看出，拟合系数随转子位置呈现出周期性的变化。在给定电流下，磁链和转矩由于电机齿槽的存在，会在转子位置 θ_r 的维度上呈现周期变化的规律。这一周期性经过电流多项式拟合后，会变成拟合系数矩阵的周期性。因此，图 2 中拟合系数的周期性是普遍存在的，可以通过傅里叶级数展开描述该变化规律。特定拟合多项式对应的系数可表示为

$$\begin{cases} A_{d,ij} = A_{d,ij}^{(0)} + \sum_{n=1}^{N_2} [A_{d,ij}^{(c,6n)} \cos(6n\theta_r) + A_{d,ij}^{(s,6n)} \sin(6n\theta_r)] = \\ \quad \mathbf{V}(\theta_r) [A_{d,ij}^{(c,6n)}, \dots, A_{d,ij}^{(c,6)}, A_{d,ij}^{(0)}, A_{d,ij}^{(s,6)}, \dots, A_{d,ij}^{(s,6n)}]^T \\ A_{q,ij} = A_{q,ij}^{(0)} + \sum_{n=1}^{N_2} [A_{q,ij}^{(c,6n)} \cos(6n\theta_r) + A_{q,ij}^{(s,6n)} \sin(6n\theta_r)] = \\ \quad \mathbf{V}(\theta_r) [A_{q,ij}^{(c,6n)}, \dots, A_{q,ij}^{(c,6)}, A_{q,ij}^{(0)}, A_{q,ij}^{(s,6)}, \dots, A_{q,ij}^{(s,6n)}]^T \end{cases} \quad (9)$$

$$A_{1,ij} = A_{q,ij}^{(0)} + \sum_{n=1}^{N_2} [A_{1,ij}^{(c,6n)} \cos(6n\theta_r) + A_{1,ij}^{(s,6n)} \sin(6n\theta_r)] = V(\theta_r) [A_{1,ij}^{(c,6n)}, \dots, A_{1,ij}^{(c,6)}, A_{1,ij}^{(0)}, A_{1,ij}^{(s,6)}, \dots, A_{1,ij}^{(s,6n)}]^T \quad (10)$$

式中: $V(\theta_r)$ 为各阶傅里叶级数的矩阵, $V(\theta_r) = [\cos(6N_2\theta_r), \dots, \cos(6\theta_r), 1, \sin(6\theta_r), \dots, \sin(6N_2\theta_r)]$ 。

电机气隙磁密的各次正弦分量对应的三相磁链经过坐标变换后对应的 dq 轴磁链只含有 6 的整数倍次谐波, $6N_2$ 即为傅里叶级数展开的最高阶次。通过在 θ_r 维度上进行傅里叶级数展开, 系数矩阵 A_d, A_q, A_t 的维度变为 $(2N_2+1) \times (N_1+1)$ $(N_1+2)/2$ 。离散的有限元数值解通过多项式拟合和傅里叶级数展开, 转化为了连续的解析解, 其变化规律可由系数矩阵体现。通过该矩阵描述电机磁链和转矩的空间谐波和磁饱和特性, 考虑转子位置和电流磁饱和, 磁链和转矩的空间解析模型可以表示为

$$\begin{cases} \psi_d(i_d, i_q, \theta_r) = V(\theta_r) A_d X(i_d, i_q) \\ \psi_q(i_d, i_q, \theta_r) = V(\theta_r) A_q X(i_d, i_q) \end{cases} \quad (11)$$

$$T_e(i_d, i_q, \theta_r) = V(\theta_r) A_t X(i_d, i_q) \quad (12)$$

2.3 基于空间解析模型的观测器

式(12)、式(13)的磁链和转矩空间解析模型与传统模型最大的区别在于在给定的电流下磁链和转矩是随转子位置 θ_r 变化的, 即电机的空间谐波特性通过 $V(\theta_r)$ 体现; 此外, 磁链和转矩随电流的变化关系是由拟合多项式获得的, 不再是简单的线性关系, 电感的磁饱和特性也可以得到考虑。以该模型为基础构建磁链和转矩观测器, 与基于式(5)、式(6)的传统模型获得的观测器相比, 精度得到了很大程度的提升。基于空间解析模型的磁链和转矩观测器原理图如图 3 所示。

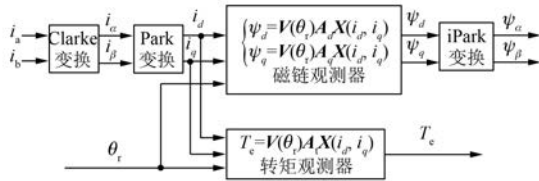


图 3 基于空间解析模型的磁链和转矩观测器原理图

将该观测器与图 1 的控制框图结合, 可以改善 SVPWM-DTC 算法的控制效果。

3 仿真和试验验证

3.1 仿真验证

仿真算法中的电机采用有限元 PMSM 模型, 其参数如表 1 所示。该电机主要用于混合动力汽车。控制算法基于图 1 通过 MATLAB/Simulink 搭建, 其中磁链和转矩观测器分别采用基于传统模型的观测器和基于空间解析模型的观测器作对比。仿真工况如表 2 所示。仿真结果如图 4~图 7 所示。

表 1 电机参数表

参数名称	参数值	参数名称	参数值
最大功率/kW	60	额定转矩/(N·m)	50
额定转速/(r·min ⁻¹)	6 000	直流电压/V	336
定子外径/mm	180	转子外径/mm	103.6
定子内径/mm	105	转子内径/mm	50
极对数	3	定子槽数	36

表 2 仿真工况

参数名称	参数值
转速/(r·min ⁻¹)	500
控制周期/s	10 ⁻⁴
设定转矩/(N·m)	5

通过对比图 4 和图 5 可以看出, 基于空间解析模型观测器的控制算法比基于传统模型观测器的算法转矩脉动得到了有效的抑制, 从 6.8 N·m 减少至 1.5 N·m, 减少了约 77.9%。但是, 电流存在较大的谐波。

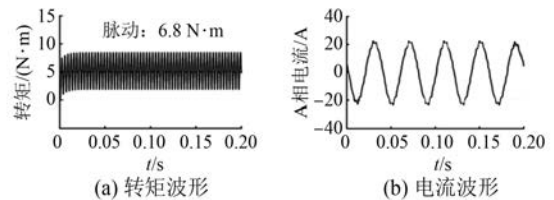


图 4 基于传统模型观测器的转矩和相电流波形

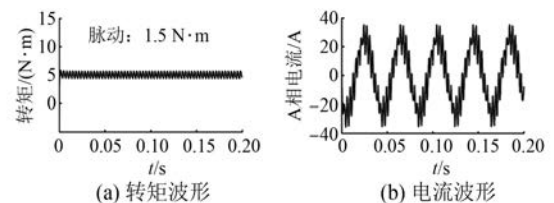


图 5 基于空间解析模型观测器的转矩和相电流波形

图 6 和图 7 为观测器误差对比图,其中 real 表示实际值,为有限元模型的输出结果,ob 表示观测器观测值。由于所选电机在设计时并没有经过斜极、斜槽的优化,齿槽效应较为明显,在基波电流激励下,转矩会存在较大的波动。但是图 6 (b)中,基于传统电机模型的观测器不考虑这部分转矩脉动,其反馈到 PI 控制器的转矩脉动较小,导致算法无法抑制该部分转矩脉动,最终得到电流波形较好但转矩脉动大的控制效果。基于空间解析模型观测器的控制算法能够准确地反馈这一部分转矩脉动,PI 控制器产生相应的磁链和电流谐波来抑制这部分转矩脉动,因此,电流波形虽然存在较大谐波,但正是这部分电流谐波起到了抑制电机齿槽转矩的作用。这体现了 SVPWM-DTC 算法可以精确观测磁链和转矩。

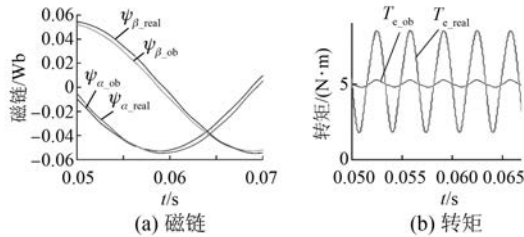


图 6 基于传统模型的观测器观测值和实际值

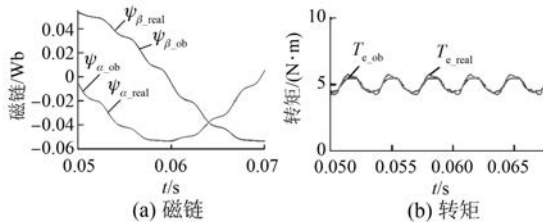


图 7 基于空间解析模型的观测器观测值和实际值

3.2 试验验证

通过电机测试台架对所提观测器进行试验验证,如图 8 所示,主要由测功机和被测电机构成。控制算法由电机控制器实现,硬件平台为 TMS320F28035,功率器件为 IGBT,开关频率为 10 kHz。试验的工况设定与表 2 相同,对 2 种不同数学模型的观测器分别进行试验,结果如图 9 和图 10 所示。

从试验结果可以看出,与仿真结果相比,试验得到的转矩脉动增大,通过对转矩波形进行 FFT 分析可以发现,转矩脉动中除了电机本身的 6、

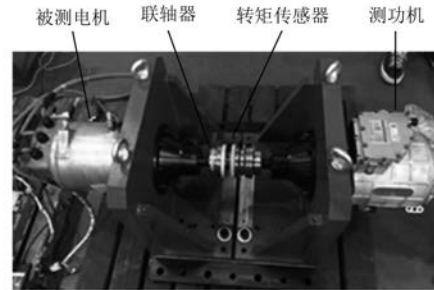


图 8 电机测试台架

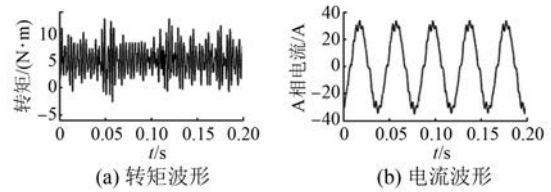


图 9 基于传统模型观测器的转矩和相电流试验波形

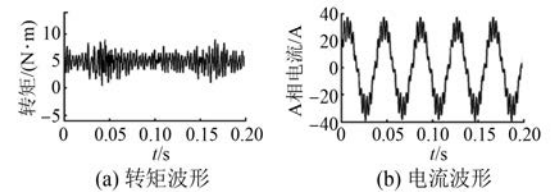


图 10 基于空间解析模型观测器的转矩和相电流试验波形

12、18 次谐波之外,还有幅值较大的其他次谐波,这些转矩脉动主要是由包括测功机和台架本身的被测电机之外的其他因素引入的。但是从图 9 (a)和图 10 (a)的转矩波形对比可看出,采用空间解析模型观测器的控制算法转矩脉动明显小于采用传统模型观测器的控制算法,通过 FFT 分析,其 12 次的转矩脉动减少了 61.30%,与仿真结果相符合。由此可见,基于空间解析模型的磁链和转矩观测器的性能明显优于传统模型的观测器,引入基于空间解析模型的观测器后,能明显减小 SVPWM-DTC 的转矩脉动,从而提升控制效果。

4 结 语

本文从描述电机空间谐波和磁饱和特性的角度出发,提出了一种基于空间解析模型的磁链和转矩观测器,并应用于 SVPWM-DTC 控制算法中。通过仿真和试验验证了该观测器具有较高精度,

能有效减小 SVPWM-DTC 的转矩脉动。这进一步推广了 DTC 的应用。

【参考文献】

- [1] TAKAHASHI I, NOGUCHI T. A new quick-response and high efficiency control strategy of an induction motor[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1986, IA-22(5): 820.
- [2] XIA C, WANG S, GU X, et al. Direct torque control for VSI-PMSM using vector evaluation factor table[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(7): 4571.
- [3] MOHAN D, ZHANG X, FOO G H B. A simple duty cycle control strategy to reduce torque ripples and improve low-speed performance of a three-level inverter fed DTC IPMSM drive[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(4): 2709.
- [4] 杨影, 陈鑫, 涂小卫, 等. 占空比调制的永磁同步电机直接转矩控制[J]. 电机与控制学报, 2014, 18(4): 66.
- [5] 陈炜, 曾思珂, 张国政, 等. 永磁同步电机改进型三矢量模型预测转矩控制[J]. 电工技术学报, 2018, 33(增刊2): 420.
- [6] 孙旭霞, 高沁源, 孙伟. 基于 SVPWM 的永磁同步电机直接转矩控制系统[J]. 电气传动, 2016, 46(11): 3.
- [7] FAN Y, ZHANG L, CHENG M, et al. Sensorless SVPWM-FADTC of a new flux-modulated permanent-magnet wheel motor based on a wide-speed sliding mode observer[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(5): 3143.
- [8] 孙丹, 陈殷, 林斌. 基于集成观测器的 PMSM 无差拍直接转矩控制系统[J]. 浙江大学学报(工学版), 2015, 49(6): 1079.
- [9] 齐忠霞, 朱小平. 基于神经网络与模糊逻辑的直接转矩控制系统[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2005, 20(1): 62.
- [10] 冯江华, 许峻峰. 基于定子磁链自适应观测的永磁同步电机直接转矩控制系统[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(12): 122.
- [11] 陈振, 刘向东, 靳永强, 等. 采用扩展卡尔曼滤波磁链观测器的永磁同步电机直接转矩控制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(33): 75.
- [12] 钟再敏, 江尚. 车用驱动电机分布参数建模方法及其应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2018.

[期刊简介]

《电机与控制应用》(原《中小型电机》)创刊于 1959 年, 是经国家新闻出版总署批准注册, 由上海电器科学研究所(集团)有限公司主办的具有专业权威的电工技术类科技期刊。

期刊定位于电机、控制和应用三大板块, 以中小型电机为基础, 拓展新型的高效节能和微特电机技术, 以新能源技术和智能控制技术引领和提升传统的电机制造技术为方向, 以电机系统节能为目标开拓电机相关应用, 全面报道国内外的最新技术、产品研发、检测、标准及相关的行业信息。

本刊每月 10 日出版, 国内外公开发行人, 邮发

代号 4-199。在半个多世纪的岁月中, 本刊为我国中小型电机行业的技术进步与发展做出了巨大的贡献, 在中国电机及其应用领域享有很高的声誉。

依托集团公司雄厚的技术实力和广泛的行业资源, 《电机与控制应用》正朝着专业化品牌媒体的方向不断开拓创新, 在全国科技期刊界拥有广泛的知名度, 是“中国学术期刊综合评价数据库来源期刊”、“中国科学引文数据库来源期刊”、“中国学术期刊(光盘版)全文收录期刊”, 得到了业内人士的普遍认可, 备受广大读者的推崇和信赖, 多次被评为中文核心期刊、中国科技核心期刊、全国优秀科技期刊。